论文

基于天宫二号POLAR的脉冲星导航实验

郑世界^{1,2*}, 葛明玉^{1,2}, 韩大炜^{1,2}, 王文彬³, 陈勇^{1,2}, 卢方军^{1,2}, 鲍天威^{1,2},
柴军营^{1,2,4,5}, 董永伟^{1,2}, 冯旻子^{1,2,4}, 贺健健^{1,2}, 黄跃^{1,2}, 孔敏南^{1,2}, 李汉成^{1,2,4},
李陆^{1,2}, 李正恒^{1,2,4}, 刘江涛^{1,2}, 刘鑫^{1,2}, 师昊礼^{1,2}, 宋黎明^{1,2}, 孙建超^{1,2},
王瑞杰^{1,2}, 王源浩^{1,2,4}, 文星^{1,2}, 吴伯冰^{1,2}, 肖华林^{1,2}, 熊少林^{1,2}, 许寒晖^{1,2},
徐明^{1,2}, 张娟^{1,2}, 张来宇^{1,2}, 张力^{1,2}, 张晓峰^{1,2}, 张永杰^{1,2}, 赵一^{1,2,4},
张双南^{1,2,4*}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
2. 中国科学院粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;
3. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 都灵理工大学电子与通讯学院, 都灵 10129, 意大利

*联系人, 郑世界, E-mail: zhengsj@ihep.ac.cn; 张双南, E-mail: zhangsn@ihep.ac.cn

收稿日期: 2017-03-26; 接受日期: 2017-04-14; 网络出版日期: 2017-04-28

国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(编号: U1631242)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFA040080X)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA04010300)和国家自然科学基金(编号: 11327303HE, 11473028, 11503028, 11503027)资助

摘要 利用天宫二号上的伽玛暴偏振探测器(POLAR)观测数据完成了X射线脉冲星导航的原理验证. 处理并分析了POLAR的观测数据, 建立了基于轨道动力学模型和脉冲星脉冲轮廓显著性分析的定轨算法, 并利用蟹状星云脉冲星的实测数据开展了单脉冲星的定轨分析. 结果表明, 该方法能够实现对天宫二号轨道的定轨, 利用POLAR一个月的在轨观测数据可得到定轨精度如下(99.7%置信度): 轨道半长轴精度7.0 m, 偏心率精度0.00026, 轨道倾角精度0.023°, 升交点赤经精度0.17°, 近地点幅角及平近地点角精度0.043°.

关键词 脉冲星导航, X射线脉冲星, 伽玛暴偏振探测器, 轨道动力学

PACS: 95.75.-z, 95.85.-e, 95.40.+s

1 引言

航天器的定轨和导航在卫星应用、载人航天和

各类太空探索中起着重要的作用. 从地球轨道、月球轨道、火星轨道到更深空轨道上的空间飞行器, 都离不开定轨和导航的支持. 目前, 近地轨道主要依赖于

引用格式: 郑世界, 葛明玉, 韩大炜, 等. 基于天宫二号POLAR的脉冲星导航实验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 099505
Zheng S J, Ge M Y, Han D W, et al. Test of pulsar navigation with POLAR on TG-2 space station (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 099505, doi: 10.1360/SSPMA2017-00080

卫星导航系统(如GPS、伽利略、北斗导航系统等), 深空轨道主要依赖于无线电技术(如美国的深空测控网等). 这些导航系统都离不开地面的支持, 随着空间飞行器的增多, 地面站的负担加重, 运行费用也越来越高; 对于深空探测, 其导航定位能力也随着与地球距离的增加而变差.

基于脉冲星的自主导航技术, 是一项较少依赖地面设备, 不需要地面测控系统连续支持的自主导航定位技术, 有助于弥补传统导航方法的局限性, 因此受到越来越多的关注. 脉冲星被称为天然的GPS卫星, 其脉冲信号的长期时间稳定度很高^[1], 可与原子钟媲美. 空间飞行器利用其脉冲信息可实现自主导航, 可大大减轻地面测控系统的工作负担, 减少测控站的布设数量, 降低航天器(星座)的运行管理和维持费用. 同时, 脉冲星能够为近地空间、太阳系乃至星际旅行的航天器增加定轨、守时等功能, 满足航天任务在不同轨道下的持续高精度导航需求.

脉冲星于1967年被Hewish等人^[2]发现, 1974年Downs^[3]提出射电脉冲星导航, 1981年Chester等人^[4]提出X射线脉冲星导航, 1993年Wood^[5]提出X射线脉冲星近地轨道导航, 1999年美国在ARGOS卫星上开展了非常规恒星定位实验(Unconventional Stellar Aspect, USA)和脉冲星导航研究. 2005年, Sheikh^[6]基于USA实验对脉冲星导航的原理、方案、候选脉冲星和精度估计等进行了较全面的研究. 2017年, NASA计划在国际空间站上搭载中子星内部成分探测器(Neutron Star Interior Composition Explorer, NICER)项目, 开展脉冲星自主导航试验(<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer>). 近年来, 国内外在X射线脉冲星导航的理论、算法及误差分析等方面还有大量研究工作^[7-14], 并针对近地轨道、火星轨道及深空轨道开展了大量的模拟分析^[15-18].

天宫二号(TG-2)空间实验室上的“天极望远镜”——伽玛射线暴偏振探测器POLAR是中国、瑞士、波兰等合作研制的一台空间天文仪器^[19], 用于伽玛暴的偏振测量, 能探测能量在15–500 keV之间的X射线光子. POLAR在轨工作期间不进行定点观测, 但其视场很大(超过 2π 立体角), 且在该能段具有较大的有效面积(约200 cm²)、较高的时间分辨率(80 ns), 因此也能够探测到脉冲星的X射线辐射信号. 本文基于POLAR的实测数据开展了脉冲星导航的实验验证.

2 POLAR数据处理

2.1 POLAR在轨观测情况

蟹状星云脉冲星(即Crab脉冲星)是宇宙中最著名的天体之一, 它诞生于公元1054年的一次超新星爆发, 该爆发被我们的祖先详细地记录在《宋史·天文志》中. Crab脉冲星自转周期约33 ms(每秒钟转动约30次), 脉冲辐射覆盖了从射电、红外、可见光、紫外、X射线乃至 γ 射线的所有能段. Crab脉冲星在X射线及软 γ 射线波段辐射流强高、自转周期在短时标尺度上相对比较稳定, 是X射线脉冲星导航中重要的导航星.

POLAR于2016年9月15日随天宫二号发射升空, 轨道高度400 km, 倾角43°, 轨道周期约90 min. 由于POLAR的视场可以覆盖超过一半的天区, 因此在接近一半的开机时间内可以探测到Crab脉冲星的X射线脉冲光子, 从而为较高精度的脉冲星导航实验提供了可能.

2.2 观测数据处理流程

POLAR观测数据的处理分为5个步骤: 事例挑选、太阳系质心修正、脉冲轮廓叠加和脉冲到达时间(Time of Arrival, TOA)计算.

(1) 事例挑选: 首先根据POLAR的指向和Crab的空间位置, 计算二者的夹角, 再挑选夹角小于90°的时间段内POLAR观测到的事例, 然后根据事例特征进一步挑选出X射线信号的事例. POLAR由1600根探测棒组成, 当带电粒子打到探测器上时, 会在很多根探测棒上产生信号, 而X射线光子的触发棒数通常 ≤ 5 . 因此只挑选触发棒数 ≤ 5 的事例, 排除了很多带电粒子事例, 能够显著降低本底的影响.

(2) 太阳系质心修正: 太阳系质心坐标系是一个较好的惯性参考系, 为得到准确的脉冲星脉冲到达时间, 需要将探测到的脉冲光子到达时间转换到太阳系质心坐标系中. 这主要包括真空延迟修正、相对论修正及不同时间系统之间的转换等.

(3) 自转频率搜索: 在此采用Pearson检验的方法搜索Crab脉冲星的自转频率.

(4) 脉冲轮廓叠加: 利用Crab脉冲星的星历或者最佳自转频率, 计算所有观测的X射线脉冲光子的相位. 统计所有光子的相位信息得到Crab脉冲星的X射线脉冲轮廓.

(5) 脉冲TOA计算: 针对每段观测数据, 折叠得到Crab的脉冲轮廓后, 利用该段数据的参考时间和脉冲轮廓峰值的相位, 得到该段数据的平均TOA.

2.3 Crab脉冲星观测结果及POLAR计时性能分析

进行脉冲星导航验证前, 首先对POLAR的Crab脉冲星观测结果进行分析, 以检验其计时观测能力和时间系统稳定性. 选取从2016年11月15日至2017年3月1日约110 d的观测数据, 从自转频率演化和计时残差两个方面进行了详细的检验. 具体处理流程如下:

首先利用美国Fermi卫星的观测数据(选择覆盖POLAR观测数据的时间), 搜索自转周期并利用最佳自转周期计算脉冲TOA(fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools), 处理的时间步长为5 d. 利用Tempo2^[20]软件进行计时分析, 其结果见表1.

对于POLAR的观测数据, 采用同样的方法搜索自转频率和脉冲TOA, 处理的时间步长约为1 d. 如图1(a)所示, 其自转频率在缓慢地降低, 并与Fermi得到的参数一致. 利用表1中的参数计算POLAR的计时残差, 也与Fermi的结果在误差范围内一致, 如图1(b)所示. 这说明POLAR的时间系统是准确而且稳定的. 计算其残差的标准偏差为84 μ s(1σ), 远远大于POLAR的80 ns的时间精度, 说明该残差主要来源于Crab脉冲星的短时标红噪声(见本文最后的讨论部分).

2.4 观测数据选取

本文选取了2017年1月4日至2月3日共31 d的观测时间段内对Crab脉冲星的观测数据, 进行脉冲星导航的验证与分析. 在此31 d的观测中, 有效观测时间约为 782×10^3 s(约占总时间的29%), 共探测到事例计数为48亿个, 其中来自于Crab脉冲星的脉冲光子数约为770万个(约占总光子数的0.16%). 得到脉冲轮廓如图2(a)所示.

表1 Crab脉冲星的计时参数

Table 1 Timing parameters of the Crab pulsar inferred from Fermi observations

脉冲星参数	参数值(误差)
星历参考点	57697.040344079745
F0 (Hz)	29.6484272934(4)
F1 (1×10^{-10} Hz S^{-1})	-3.689865(1)
F2 (1×10^{-20} Hz S^{-2})	1.16(1)
F3 (1×10^{-28} Hz S^{-3})	3.4(3)

图1 (网络版彩图)(a) Crab脉冲星的自转频率演化, 红色点是观测数据, 绿线是拟合结果, 为了更加清楚显示频率演化, 观测数据点已扣除线性趋势项($29.648422 - t \times 3.68 \times 10^{-10}$); (b) 计时残差, 蓝色点为Fermi观测结果, 红色点为POLAR观测结果(利用Tempo2软件分析结果), 单位是千分之一周期. 两条虚线之间的观测代表本次导航实验所利用数据对应的时间段

Figure 1 (Color online) (a) The evolution of the spin frequency of the Crab pulsar observed by POLAR. Each data point is subtracted by ($29.648422 - t \times 3.68 \times 10^{-10}$) to show the details of its frequency evolution. The red square represents the observed data, and the green line represents the fitted result; (b) the time residuals of the Crab pulsar observed by Fermi and POLAR, as represented by the blue and red squares respectively. The observations between the two vertical dashed lines are used for further analysis to do pulsar navigation tests.

示, 不同时间的脉冲轮廓如图2(b)所示. 在第115–125 d之间(2017年1月8–18日), 脉冲轮廓的信噪比有所降低(从约11降至8), 这是由于该段时间内探测器与Crab脉冲星的夹角比较大, 探测到的脉冲光子数比较少(参见图3(c)).

3 基于POLAR的脉冲星导航算法

3.1 导航算法

与传统的导航方法不同, 基于POLAR的脉冲星探测有如下特点:

(1) 观测数据的累积时间长. 脉冲星导航的基本测量量是脉冲星的脉冲轮廓, 高精度的脉冲轮廓的获得需要较长时间的积分. 图3给出了POLAR在5, 50, 100和400 ks有效曝光时长下的脉冲轮廓.

(2) 脉冲轮廓与轨道紧密耦合在一起. 由于地球和飞行器的运动, 探测到的脉冲光子到达时间中, 不仅包含了脉冲星本身的周期性质, 还包含了地球和飞

图 2 (网络版彩图)(a) POLAR在31 d内观测到的Crab脉冲轮廓; (b) 不同时间段探测到的脉冲轮廓图, 其中脉冲轮廓已扣掉本底; (c) 脉冲光子数随时间的变化

Figure 2 (Color online) (a) The total profile of the Crab pulsar in 31 d by POLAR; (b) the normalized pulse profile in different time intervals with background subtracted; (c) the counts of pulsed photons as function of time.

图 3 不同有效观测时长观测得到的Crab脉冲轮廓. (a) 5 ks; (b) 50 ks; (c) 100 ks; (d) 400 ks. 其中, 脉冲轮廓已做归一化处理

Figure 3 The Crab profiles with different exposure times. (a) 5 ks; (b) 50 ks; (c) 100 ks; (d) 400 ks. All the profiles are normalized.

行器轨道的调制.

针对POLAR的观测数据特性, 我们不再选取脉冲TOA作为脉冲星导航的观测量, 而是直接对观测脉冲轮廓进行分析. 定义脉冲轮廓的显著性 χ^2 , 如下式所示:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(p(i) - \bar{p})^2}{\bar{p}}, \quad (1)$$

其中, $p(i)$ 是经过归一化的脉冲轮廓, $\bar{p}$ 是 $p(i)$ 的平均值.

当预测轨道与真实轨道越接近时, 得到的脉冲轮廓越接近真实轮廓, 显著性 χ^2 越大. 以POLAR轨道的半长轴为例, 图4显示当起始时刻的半长轴偏离 ± 50 m时, 计算得到的脉冲轮廓会发生畸变, 其显著性 χ^2 也从 1.05×10^4 分别下降到 0.96×10^4 (偏离 -50 m)和 0.97×10^4 (偏离 $+50$ m).

基于以上分析结果, 我们借鉴脉冲星周期搜索方法, 建立了轨道动力学模型和脉冲轮廓显著性分析相结合的定轨算法. 轨道动力学模型可以在短期内得到较高精度的预报轨道, 用以完成所需积分时间内的脉冲轮廓折叠; 同时, 利用脉冲轮廓长期稳定特性不断更新轨道参数, 又可以解决轨道模型长期漂移的问题. 算法流程如图5所示, 首先给出估计的初始轨道参数和参数空间, 利用轨道动力学模型进行轨道预报, 分析得到基于该预报轨道的观测脉冲轮廓. 然后通过对此观测脉冲轮廓的显著性分析, 搜索最优轨道参数.

针对TG-2号飞行器轨道动力学特征(轨道高度约400 km, 地球摄动力较复杂), 建立了70阶重力场的地

图 4 (网络版彩图)脉冲轮廓随不同半长轴偏离值的变化, 其中脉冲轮廓已归一化. (a) 绿色代表利用真实轨道得到的脉冲轮廓, 而红色和蓝色分别对应于起始时刻半长轴偏离 -50 m和 $+50$ m时得到的脉冲轮廓; (b) 半长轴偏离 -50 m时, 脉冲轮廓偏离情况; (c) 半长轴偏离 $+50$ m时, 脉冲轮廓偏离情况

Figure 4 (Color online) The distortion of pulse profile induced by wrong initial element such as semi-major axis. (a) The green profile is generated with the accurate orbit. Red and blue profiles represent the distortion induced by semi-major axis -50 m and semi-major axis $+50$ m, respectively; (b) the differences between the right profile and distorted profile by semi-major axis -50 m; (c) the differences between the right profile and distorted profile by semi-major axis $+50$ m.

图5 脉冲星导航算法的处理流程
Figure 5 Processing flow of pulsar navigation.

球轨道模型, 并对飞行器的帆板运动姿态进行精确建模, 提高大气阻力模型精度. 采用的轨道动力学模型^[21,22]见表2所示. 轨道积分器为龙格-库塔-芬尔格方法(Runge-Kutta-Fehlberg)7(8), 积分步长为60 s. 在此情况下可以满足轨道外推的需要, 未来实际应用时, 可以根据飞行器计算资源情况不同, 做进一步简化.

3.2 初步定轨结果

TG-2的轨道状态用6个轨道根数来表示, 分别是

表2 轨道动力学模型
Table 2 The basic elements and descriptions applied in orbital dynamic models

动力学模型	描述
静态动力场	GGM01C (70×70) 固体潮(IERS 2003)
潮汐扰动	海潮(UT/CSR3.0) 极潮(IERS 2003)
三体引力	日月引力
大气阻力	大气密度模型NRLMSISE 2000 太阳通量NOAA solar flux (daily) 地磁指数Geomagnetic activity (3 hourly)
太阳辐射光压	双锥形地球阴影模型

半长轴(a)、偏心率(e)、轨道倾角(i)、升交点赤经(ω)、近地点幅角(Ω)和平近地点角(w), 采用J2000坐标系. 其历元参考点: UTC时间2017年1月4日, 00:00:00.000.

首先选取TG-2号的精密定轨结果作为初始值, 兼顾轨道参数覆盖范围和计算效率, 选用轨道根数初始值的偏移量如表3所示. 在此参数空间内的每个格点处, 分别计算得到观测脉冲轮廓, 并得到其显著性.

选用中国科学院高能物理研究的集群计算环境, 对于POLAR 31 d约75 GB的观测数据, 使用600个CPU核耗时约10 h, 得到结果如图6所示.

由图6可看出, 脉冲轮廓的显著性 χ^2 随着轨道参数的偏离有显著变化, 在真实值(零值)附近, χ^2 具有极

表3 轨道根数初始值的偏移量^{a)}
Table 3 The bias of the orbit elements

轨道根数	最小值	最大值	搜索步长
半长轴	-50 m	50 m	5 m
偏心率	-0.0018	0.0022	0.0002
轨道倾角	-0.5°	0.5°	0.05°
升交点赤经	-1.0°	1.0°	0.1°
近地点幅角	-1.0°	1.0°	0.1°
平近地点角	-1.0°	1.0°	0.1°

a) 其中零值点为卫星轨道根数参考值

图6 (网络版彩图) χ^2 随轨道参数偏移量的变化结果. 蓝色点为不同参数的计算结果, 红色为最优值拟合结果, 0值点为实际轨道根数值. (a) 半长轴; (b) 偏心率; (c) 轨道倾角; (d) 升交点赤经; (e) 近地点幅角; (f) 平近地点角

Figure 6 (Color online) χ^2 of the orbit elements of calculations (blue squares) and fitted results (red lines). (a) Semi-major axis; (b) eccentricity; (c) inclination; (d) Right Ascension of the Ascending Node (RAAN); (e) argument of perigee; (f) mean anomaly.

大值. 通过二次函数曲线拟合得到的最大值, 可以分别给出6个轨道参数的最优解.

为了更好的估计这6个轨道参数的误差, 我们采用bootstrap方法^[23], 即对脉冲轮廓分别进行泊松抽样并重新计算轨道参数最优值. 在此, 针对每一个参数共抽样5000次, 得到轨道参数分布如图7所示.

对抽样结果进行统计分析, 得到轨道参数的误差(99.7%置信度). 如表4所示.

利用搜索得到的最优轨道参数(如表4所示最优值)得到定轨结果, 并与TG-2号的实际轨道数据进行对比, 计算其均方根, 得到其位置和速度的误差如表5所

图7 轨道参数的统计分析结果. 0值点为实际轨道值. (a) 半长轴; (b) 偏心率; (c) 轨道倾角; (d) 升交点赤经; (e) 近地点幅角; (f) 平近地点角

Figure 7 Distribution of the parameters obtained by bootstrap process, from which the errors of these orbit elements can be estimated. (a) Semi-major; (b) eccentricity; (c) inclination; (d) RAAN; (e) argument of perigee; (f) mean anomaly.

表4 轨道参数最优值和误差

Table 4 The best estimated value of the elements and errors (3σ)

轨道根数	最优值 ^{a)}	误差(3σ)
半长轴 (m)	1.4	7.0
偏心率 (1×10 ⁻⁴)	-2.5	2.6
轨道倾角 (°)	0.0032	0.023
升交点赤经 (°)	-0.023	0.17
近地点幅角 (°)	-0.0024	0.043
平近地点角 (°)	-0.0017	0.043

a) 此处最优值指的是通过参数空间搜索得到的最优偏差值

表5 轨道位置和速度的误差

Table 5 Errors of the positions and velocities

轨道参数	误差
X (km)	11.5
Y (km)	13.1
Z (km)	9.1
V _x (km/s)	0.30
V _y (km/s)	0.31
V _z (km/s)	0.010

示. 事实上, 我们的定轨结果只使用了脉冲星观测数据, 没有使用实际的轨道数据, 所以表5给出的是脉冲星导航得到的轨道位置与速度和轨道数据得到的轨道位置与速度之间的差值.

4 讨论和结论

利用POLAR对Crab脉冲星的在轨观测数据, 我们进行了脉冲星导航的原理验证. 通过建立基于轨道动力学模型和轮廓分析的导航算法, 初步实现了利用脉冲星探测进行空间飞行器的定轨. 针对POLAR一个月的在轨观测数据, 得到了初始历元时刻6个轨道参数的最优值与误差. 除偏心率外, 其最优值均与真实值在1倍误差范围吻合; 偏心率也与真实值在3倍误差内一致.

标准脉冲轮廓通常被认为是X射线脉冲星导航中的一个重要输入量. 但是, 在空间X射线探测中会受多种因素的影响, 比如, 不同探测器的探测能段和仪器响应不同, X射线光子入射方向不同, 脉冲轮廓也不同, 甚至随着探测器长时间运行后的性能改变后, 也会使得其探测到的脉冲轮廓发生改变. 如果使用预先设定的“标准脉冲轮廓”, 必然会影响到脉冲星导航的导航精度, 甚至会产生难以估计的系统偏差. 本文中所采用的自主定轨算法中, 直接对不同轨道参数下得到的脉冲轮廓进行显著性分析, 搜索确定最优轨道参数值, 而非使用脉冲TOA作为导航观测量, 因此也不再依赖于标准脉冲轮廓, 有助于应用到不同探测器、不同任务场景中, 而且得到的结果也不会受到脉冲星观测条件以及探测器性能变化的影响.

本文的X射线脉冲星导航实验中, 对单脉冲星情况下的导航结果进行了验证, 即只选取了1颗脉冲星(Crab脉冲星)作为导航脉冲星. 由于观测得到的脉冲

星脉冲轮廓只能对沿该脉冲星方向的轨道进行约束, 在此情况下, 脉冲星与轨道面的夹角不同, 其对不同轨道参数都有不同影响. 本次定轨所选的时间段中, 脉冲星方向与轨道面的夹角在 0.6° – 64.6° 内连续变化. 接下来, 在获得更多的观测数据后, 将对不同轨道夹角时的定轨精度进行进一步分析.

脉冲星本身的计时噪声也会对脉冲星导航的精度产生较大影响. 脉冲星的脉冲TOA与计时模型的残差存在长时标的变化, 即计时噪声^[24], 即使是自转周期相对稳定的毫秒脉冲星, 也存在振幅几个微秒的时间噪声. 脉冲星的计时噪声中包含红噪声和白噪声, 白噪声可以通过长时间的观测数据累积来抑制, 但红噪声很难压低或消除. 其中, 自转频率的二阶导数对应长时标的红噪声, 其三阶导数对应较短时标的红噪

声, 而更高阶的导数对应于更短时标的红噪声. 对于Crab脉冲星, 其长时标的时间噪声可达1 ms, 短时标内的红噪声也达到80多微秒(参见图2). 本文中由于使用了Fermi卫星的同步观测结果, 消除了长时标的红噪声的影响, 但短时标的红噪声和白噪声仍然对导航结果有影响. 利用长时间观测的结果将有利于发现计时噪声的规律性现象(如准周期性), 结合噪声起源的物理机制(如磁场演化)研究^[25–28], 有可能对脉冲星的周期特性给出更准确的预言, 从而降低计时噪声(特别是红噪声)对脉冲星导航精度的影响. 另外, 脉冲星还存在周期跃变, 即自转周期突然变化的现象, 也会对脉冲星导航产生较大影响. 本文使用的观测数据所涉及时段内, 未发现Crab脉冲星的周期跃变现象, 因此暂未考虑该因素.

参考文献

- 1 Taylor J H. Millisecond pulsars: Nature's most stable clocks. *Proc IEEE*, 1991, 79: 1054–1062
- 2 Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 1968, 217: 709–713
- 3 Downs G S. Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources. Technical Report, NASA, 1974. 19740026037
- 4 Chester T J, Butman S A. Navigation Using X-Ray Pulsars. Technical Report, JPL, 1981, 22–25
- 5 Wood K S. Navigation studies utilizing the NRL-801 experiment and the ARGOS satellite. *Proc SPIE*, 1993, 1940: 105–116
- 6 Sheikh S I. The Use of Variable Celestial X-ray Sources for Spacecraft Navigation. Dissertation for Doctoral Degree. Washington: University of Maryland, 2005
- 7 Becker W, Bernhardt M G, Jessner A. Autonomous spacecraft navigation with pulsars. *Acta Futura*, 2013, 7: 11–28
- 8 Shuai P, Chen S L, Wu Y F, et al. Navigation principles using X-ray pulsars (in Chinese). *J Astron*, 2007, 28: 1538–1543 [帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X射线脉冲星导航系统原理与方法. 宇航学报, 2007, 28: 1538–1543]
- 9 Fei B J. Application of Relativity in Modern Navigation. 2nd ed (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2007 [费保俊. 相对论在现代导航中的应用. 北京: 国防工业出版社, 2007]
- 10 Zheng W, Wang Y D, Tang G J, et al. X-ray Pulsar-Based Navigation Theory and Applications (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [郑伟, 王奕迪, 汤国建, 等. X射线脉冲星导航理论与应用. 北京: 科学出版社, 2015]
- 11 Deng X P, Hobbs G, You X P, et al. Interplanetary spacecraft navigation using pulsars. *Adv Space Res*, 2013, 52: 1602–1621, arXiv: 1307.5375
- 12 Wang Y, Zheng W, Sun S, et al. X-ray pulsar-based navigation system with the errors in the planetary ephemerides for Earth-orbiting satellite. *Adv Space Res*, 2013, 51: 2394–2404
- 13 Emadzadeh A A, Speyer J L. X-ray pulsar-based relative navigation using epoch folding. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2011, 47: 2317–2328
- 14 Zhou Q Y, Ji J F, Ren H F. Timing equation in X-ray pulsar autonomous navigation (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 139701 [周庆勇, 姬剑锋, 任红飞. X射线脉冲星自主导航的观测方程. 物理学报, 2013, 62: 139701]
- 15 Xiong K, Wei C L, Liu L D. Research on the autonomous navigation of satellite constellation using pulsars (in Chinese). *J Astron*, 2008, 29: 545–566 [熊凯, 魏春岭, 刘良栋. 基于脉冲星的卫星星座自主导航技术研究. 宇航学报, 2008, 29: 545–566]
- 16 Shemar S, Fraser G, Heil L, et al. Towards practical autonomous deep-space navigation using X-ray pulsar timing. *Exp Astron*, 2016, 42: 101–138
- 17 Cui P, Wang S, Gao A, et al. X-ray pulsars/Doppler integrated navigation for Mars final approach. *Adv Space Res*, 2016, 57: 1889–1900
- 18 Wei E, Jin S, Zhang Q, et al. Autonomous navigation of Mars probe using X-ray pulsars: Modeling and results. *Adv Space Res*, 2013, 51: 849–857
- 19 Xiao H L, Dong Y W, Wu B B, et al. Polar gamma ray burst polarimeter onboard TG-2 spacelab (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2015, 21: 32–36 [肖华林, 董永伟, 吴伯冰, 等. TG-2伽玛暴偏振探测仪POLAR. 载人航天, 2015, 21: 32–36]

- 20 Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. Tempo2, a new pulsar-timing package - I. An overview. [Mon Not R Astronl Soc](#), 2006, 369: 655–672
- 21 Wang W, Gao Y. Effective empirical acceleration modeling and its application to enhanced-accuracy orbit prediction. [Aerospace Tech Jpn](#), 2016, 14: Pd_39–Pd_45
- 22 Wang W B, Liu R F. A new method of orbit prediction for LEO satellites using empirical accelerations (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2015, 35: 715–720 [王文彬, 刘蓉芳. 基于经验加速度的低轨卫星轨道预报新方法. *空间科学学报*, 2015, 35: 715–720]
- 23 Diaconis P, Efron B. Computer-intensive methods in statistics. [Sci Am](#), 1983, 248: 116–130
- 24 Hobbs G, Lyne A G, Kramer M. An analysis of the timing irregularities for 366 pulsars. [Mon Not R Astronl Soc](#), 2010, 402: 1027–1048, arXiv: [0912.4537](#)
- 25 Yi S X, Zhang S N. The evolution of the magnetic inclination angle as an explanation of the long term red timing-noise of pulsars. [Mon Not R Astron Soc](#), 2015, 454: 3674–3678, arXiv: [1509.08312](#)
- 26 Gao X D, Zhang S N, Yi S X, et al. Understanding the residual patterns of timing solutions of radio pulsars with a model of magnetic field oscillation. [Mon Not R Astron Soc](#), 2016, 459: 402–418, arXiv: [1603.04998](#)
- 27 Zhang S N, Xie Y. Testing models of magnetic field evolution of neutron stars with the statistical properties of their spin evolutions. [Astrophys J](#), 2012, 757: 153, arXiv: [1207.1485](#)
- 28 Zhang S N, Xie Y. Why do the braking indices of pulsars span a range of more than 100 millions? [Astrophys J](#), 2012, 761: 102, arXiv: [1209.2478](#)

Test of pulsar navigation with POLAR on TG-2 space station

ZHENG ShiJie^{1,2*}, GE MingYu^{1,2}, HAN DaWei^{1,2}, WANG WenBin³, CHEN Yong^{1,2},
LU FangJun^{1,2}, BAO TianWei^{1,2}, CHAI JunYing^{1,2,4,5}, DONG YongWei^{1,2},
FENG MingZi^{1,2,4}, HE JianJian^{1,2}, HUANG Yue^{1,2}, KONG MinNan^{1,2},
LI HanCheng^{1,2,4}, LI Lu^{1,2}, LI ZhengHeng^{1,2,4}, LIU JiangTao^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, SHI HaoLi^{1,2},
SONG LiMing^{1,2}, SUN JianChao^{1,2}, WANG RuiJie^{1,2}, WANG YuanHao^{1,2,4},
WEN Xing^{1,2}, WU BoBing^{1,2}, XIAO HuaLin^{1,2}, XIONG ShaoLin^{1,2}, XU HanHui^{1,2},
XU Ming^{1,2}, ZHANG Juan^{1,2}, ZHANG LaiYu^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, ZHANG XiaoFeng^{1,2},
ZHANG YongJie^{1,2}, ZHAO Yi^{1,2,4} & ZHANG ShuangNan^{1,2,4*}

¹ The Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Key Laboratory of Particle Astrophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁵ Department of Electronics and Telecommunications, Politecnico di Torino, Torino 10129, Italy

Pulsar navigation, which utilizes pulsar observations to determine the position or orbit of a spacecraft, has raised interests of many countries. Several projects, such as NICER, have been proposed. POLAR on-board the TG-2 space station of China has worked for about half year and its main task is to measure the polarization of the gamma-ray bursts. POLAR can also detect the photons from pulsars due to its large effective area (about 200 cm²) and wide field of view (more than 2 π Sr). In this work we report our first results testing pulsar navigation with POLAR observations. A new navigation algorithm has been used that combines the orbit dynamics and pulsar profile analysis. With 31-day-long observations of the Crab pulsar, the TG-2 orbit was determined successfully. The parameter values of the orbital elements are solved and the errors are estimated by bootstrap method. The errors with 99.7% confidence are: semi-major axis error of 7.0 m, eccentricity error of 0.00026, inclination error of 0.023°, Right Ascension of the Ascending Node (RAAN) error of 0.17°, error for argument of perigee of 0.042° and mean anomaly error of 0.042°.

pulsar navigation, X-ray pulsar, POLAR, orbital dynamics

PACS: 95.75.-z, 95.85.-e, 95.40.+s

doi: [10.1360/SSPMA2017-00080](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00080)